



УДК 621.438.082.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ ФОРМ ЛОПАТОК ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА НА ЗАПАС ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И КПД СТУПЕНИ

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF TANGENTIAL SHAPE OF THE AXIAL COMPRESSOR GAS-DYNAMIC STABILITY STOCK AND EFFICIENCY OF STAGE

Пузанова Анастасия Владиславовна, студент каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Серков Сергей Александрович, аспирант каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: serkov.s.a@mail.ru, Тел.: +7(922) 224-11-06.

Anastasia V. Puzanova, student at Department "Turbines and Engines", Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia.

Sergey A. Serkov, Phd Student at Department "Turbines and Engines", Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: serkov.s.a@mail.ru, Ph.: +7(922)224-11-06

Аннотация: В данной работе представлено исследование формы навала лопаток первой ступени осевого компрессора в окружном направлении за счет варьирования переменных кривой Безье второго порядка, которая образует форму средней линии. Проектирование связано с оптимизацией профиля пера лопатки совместно с CFD анализом. Анализ результатов показал целесообразность применения навала для оптимизации течения потока, повышения эффективности и запаса газодинамической устойчивости ступени.

Abstract: In this paper, a study is presented of the shape of the first stage of the axial compressor in the circumferential direction by varying the variables of the Bézier curve of the second order, which forms the midline of the shape. The design is related to the optimization of the profile of the blade of the fan together with the CFD analysis. The analysis of the results showed the expediency of applying the bulk to optimize the flowing of flow, increasing the efficiency and the margin of the gas-dynamic stability of the step.

Ключевые слова: осевой компрессор; трехмерная оптимизация; тангенциальный навал.

Keywords: axial compressor; three-dimensional optimization; tangentiallean.

Доводка современных лопаточных машин, таких как осевые компрессоры (ОК), осуществляется с помощью трехмерной оптимизации формы лопаток. Оптимизация формы лопатки позволяет увеличить КПД лопаточных венцов за счет расширения диапазона устойчивой работы профилей лопатки и снижения потерь. Одним из способов повышения эффективности лопаточных венцов ОК является тангенциальный навал. Введение навала позволяет сделать равномерными характеристики потока по высоте лопаток, сократить угол отставания на выходе из решетки, улучшить структуру течения при стационарном взаимодействии РК и НА, а также повысить эффективность и запас газодинамической устойчивости ОК [1,2].

Анализ результатов исследований в данной области показал, что при комплексном применении тан-

генциального навала для лопаток направляющего аппарата (НА) с учетом эффектов взаимного влияния ступеней, снижаются профильные и концевые потери, ослабляется эффект радиального зазора и при этом изоэнтропический КПД компрессора на номинальном режиме возрастает на 0,8%, а расход воздуха на 2,4% [3]. Так же в работе [4] установлено что положительный эффект при введении навала достигается преимущественно за счет улучшения структуры течения в концевых областях. Для решетки НА при вогнутой стороне разрежения профиля выявлено уменьшение угла отставания в периферийной области.

В работе [5], показано, что применение сложного тангенциального навала, приводит вместе с повышением эффективности к увеличению расхода через решетку. Однако при оптимизации лопаточ-

ных аппаратов ступени необходимо выдерживать постоянство расхода исходного и оптимизированного вариантов. В связи с этим появляется необходимость введения, по крайней мере, одного дополнительного параметра, характеризующего ограничение по расходу в процессе оптимизации.

Данные изменения в расходе и КПД связаны в первую очередь с изменением центробежной составляющей в уравнении радиального равновесия (1). Чем эта величина больше, тем больше радиальная неравномерность потока. Это приводит к образованию вторичных вихрей и смещению ядра потока ближе к периферии, что снижает плотность линий тока в корневой части и вызывает преждевременную турбулизацию потока на спинке лопатки.

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dr} = \left(\frac{1-M_z^2}{1-M_m^2} \right) \cdot \left(\frac{C_u^2}{r} - \frac{D_z^2}{Dz^2} \cdot W_z^2 \right) + \frac{W_r}{1-M_m^2} \times$$

$$\times \left\{ W_z \cdot \left[\frac{d(r \tan \varphi)}{dr} \right] + \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{D\lambda}{Dz} \cdot \left(\frac{1}{Cp} \right) \cdot \left(\frac{Q}{T} \right) \right\} +$$

$$+ \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{P_{te} - P_{te}}{\theta_{te} - \theta_{te}} \right) \cdot \frac{1}{r} \cdot \left(\frac{M_r \cdot M_u}{1-M_m^2} \cdot \tan^G F_u \right) +$$

$$+ \frac{-G_0 + G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5}{1-M_m^2} \quad (1)$$

Где А - центростремительное ускорение, В - осевая кривизна линии тока, С - градиент наклона, D - загромождение, Е - выделенное тепло, F - изменение энтропии, G - центробежная сила, Н - выражение для усреднения среднемассовых значений отличных от среднего значения, Р - давление, Т - температура, φ - угол наклона линии тока, λ - загромождение, ρ - плотность, М - число Маха.

Положительный эффект от тангенциального навала зависит от направления изгиба лопатки. Из исследования [6] видно, что на увеличение запаса газодинамической устойчивости, и увеличение КПД оказывает влияние тангенциальный навал с прогибом в сторону поверхности давления. Это заставляет поток перераспределяться к концевым областям, тем самым снижая углы отставания в этих зонах.

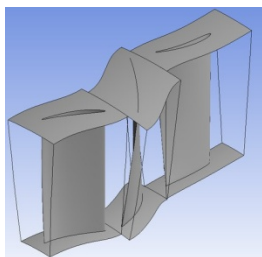


Рис. 1. Трехмерная модель первой ступени ОК

Основываясь на мировом опыте предыдущих исследований и исходя из анализа уравнения радиального равновесия (1) установлено, что повыше-

ния интегральных параметров ступеней ОК возможно добиться за счет трехмерного проектирования ступеней, а в частности применения тангенциального навала. В данной статье показано исследование формы навала в окружном направлении с изменением экстремума кривой средней линии лопатки.

Для исследования влияния тангенциального навала была выбрана первая ступень перепрофилированного ОК ГТК-10-4. Проектирование нового лопаточного аппарата выполнено в собственном программном коде проектирования осевых компрессоров, который состоит из модуля расчета газодинамических параметров, основанном на методе решения уравнения радиального равновесия вдоль квази-ортогональных линий тока в меридиональной плоскости (1), а так же из модуля профилирования лопаток.

Данная ступень имеет коэффициент нагрузки ψ в корневой части от 0.6 до 0.65 что соответствует углу поворота потока в НА порядка 33-38 градусов.

Профилирование лопаток включает в себя возможность получения трехмерной формы лопатки за счет соединения плоских профилей построенных по заданным геометрическим параметрам (Рисунок 2А). В данной работе не производилась оптимизация формы плоских профилей, а было принята форма аэродинамического стандартного распределения толщины NACA 65.

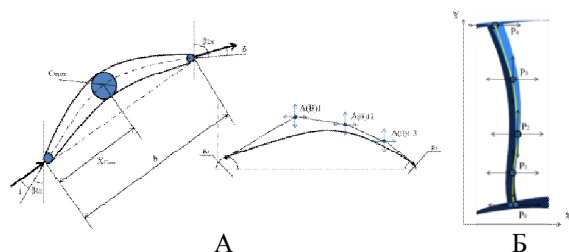


Рис. 2. Параметризация плоского профиля (А) и средней линии лопатки (Б)

В_{1л} - входной лопаточный угол, В_{2л} - выходной лопаточный угол, i - угол атаки, δ - угол отставания,

b - хорда, С_{max} - максимальная толщина, X_{Сmax} - положение максимальной толщины, R_{1,2} - радиусы входной и выходной окружности, А_г - управляющие точки спинки, В_г - управляющие точки корыта, Р_г - управляющие точки средней линии

Для исследования тангенциального навала выбрано три формы изгиба лопатки (Рисунок 3). Для получения тангенциального навала используются следующие зависимости: изменение средней линии пера лопатки (Рисунок 3), смещение сечений и придание оси лопатки формы кривой второго порядка.

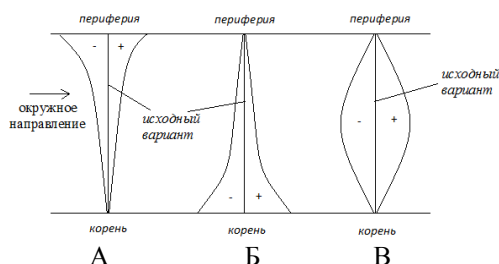


Рис. 3. Схема тангенциального навала лопаток:
А – на периферийном; Б – корневом;
В – среднем сечениях

Представленные формы тангенциального навала дают возможность изучить влияние положения сечений лопатки на структуру потока в широком диапазоне с изменением от 0% до $\pm 15\%$ с шагом 2.5%. Данный шаг изменения формы выбран исходя из необходимости зафиксировать максимум КПД от тангенциального навала, а так же из возможности оценить влияние формы лопатки на увеличение запаса ГДУ.

Изменение навала лопаток осуществляется за счет варьирования выбранной переменной кривой Безье второго порядка, которая находится на выбранном сечении лопатки. Для получения «косо-го» навала с линейным изменением положения плоских профилей применялось перемещение периферийного сечения в окружном направлении, а для получения С-образной формы лопатки применялось перемещение средней управляющей точки кривой на заданное расстояние.

Стоит отметить, что прочностные расчеты для данных форм лопатки не проводились, но при задании такого диапазона изменения учитывались возможности применения таких лопаток в ОК. Исследования течения в ступени осуществлялись в программном комплексе вычислительной газодинамики. По известным геометрическим данным построены профили лопаток, а также меридиональные обводы. Осевое расстояние между РК и НА осталось постоянными, и не изменялось в последующих расчетах.

Разбиение на конечные элементы осуществлялось в сеточном генераторе. Количество ячеек для каждого расчетного домена приведено в Таблице 1.

Таблица 1.

Количество ячеек расчетной области.	
Домен	Количество ячеек
ВНА	250 000
РК	300 000
НА	400 000

В качестве модели турбулентности принята высокорейнольдсовая двухпараметрическая модель $k-\square$. Параметр y^+ находился в пределах от 15 до 150. Сходимость расчета достигала величины невязок 10^{-5} в среднем за 200 итераций. Граничными усло-

виями для расчета в CFX являлись полное давление P_{1T} и полная температура T_{1T} на входе, а так же статическое давление на выходе $P_{2ст}$. На границах доменов использовался метод осреднения «stage». Данная ступень выбрана исходя из условий высокой нагрузки корневых сечений и пониженных значений КПД данной части. Основными проблемными зонами является спинка профиля НА, на которой образуется срыв потока в корневой части (Рисунок 4А).

Для оценки запаса ГДУ и КПД была рассчитана номинальная изодрома работы ступени. Для исходной ступени запас ГДУ составляет порядка 12% и политропный КПД в номинальной точке порядка 0,908.

Изменение конструкции лопаточного аппарата компрессора приводит к смещению границы помпажа в левую верхнюю часть характеристики ступени. При исследовании влияния тангенциального навала на РК первой ступени на трех сечениях получены следующие результаты, представленные на рисунках 5-6.

Применение навала на периферии для РК не приводит к улучшению интегральных характеристик (Рисунок 5В, 6В), следовательно, его использование нецелесообразно, так как это не дает прироста ни в коэффициенте запаса устойчивости ни в КПД, полученные результаты совпадают с исходным, а в некоторых вариантах ГДУ снижается.

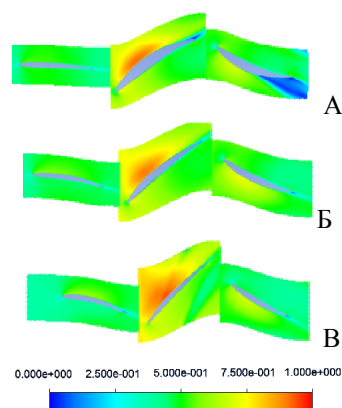


Рис. 4. Распределение чисел Маха в сечениях ступени: А – корневое, Б – среднее,
В – периферийное сечения

Исследование влияния тангенциального навала на рабочее колесо с прогибом на 50% высоты позволяет судить о том, что максимальное увеличение π_k достигается при положительном навале 7.5%, при этом запас ГДУ увеличился до 14,5%. Остальные варианты исследования не дают положительного эффекта на коэффициент устойчивости, что видно из Рисунка 6Б. При незначительном изгибе лопатки до 5% заметно увеличение КПД на 1.4% (Рисунок 5Б).

Так же значительного прироста в КПД, при использовании навала в корневом сечении, не замечено (Рисунок 5А). При расчете навала на 0% высоты РК запас коэффициента устойчивости на положительных (в сторону спинки) навалах увеличивается на 5% (Рисунок 6А).

спинки РК при этом достигается наибольшее приближение к углу поворота в венце (Рисунок 7А, 8Б). Так же стоит отметить, что при влиянии на форму лопатки РК не происходит заметного изменения на структуру потока в межлопаточном канале НА.

Во всех вариантах исследования формы лопатки замечено увеличение скорости на поверхности

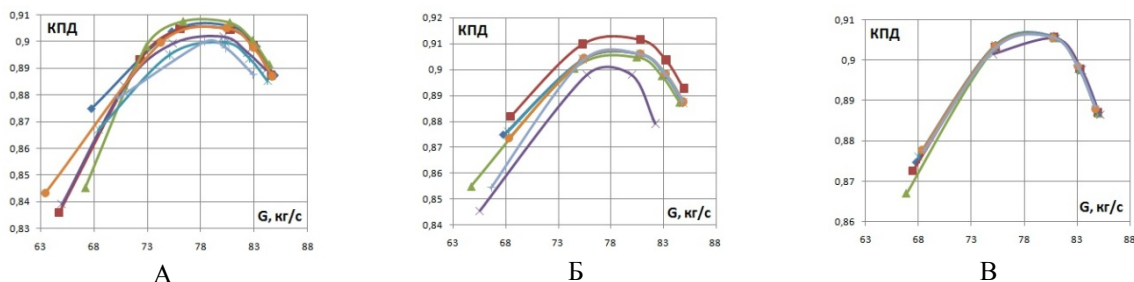


Рис. 5. Характеристика компрессора КПД-G для рабочего колеса

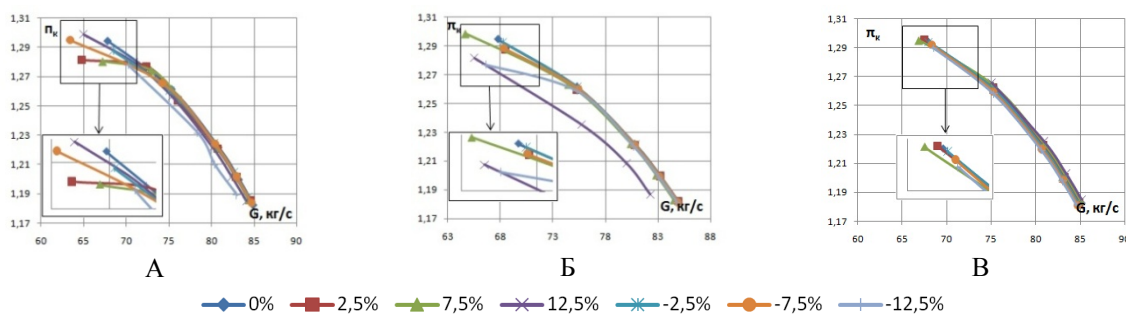


Рис. 6. Характеристика компрессора π_k -G для рабочего колеса

А – корневое, Б – среднее, В – периферийное сечения

Изгиб лопатки в положительную сторону в корневой части приводит к выравниванию статического давления по высоте (рисунок 9А), как следствие этого, увеличивается статическая плотность в выходной части венца, что снижает радиальные перемещения потока в сторону периферии (рисунок 7А). Во всех остальных же случаях, статическое давление находится на уровне исходного варианта и не оказывает влияния на структуру потока.

Так же при выравнивании статического давления по высоте лопатки происходит перераспределение потока из средней части канала в корневую и периферийную зоны. Это позволяет увеличить расходную составляющую абсолютной скорости и увеличивает расход воздуха.

Из анализа углов потока установлено, что положительный эффект, при навале в корневой части, достигается при изгибе пера лопаток в сторону поверхности разряжения. При этом срыв потока снижается, сокращается угол отставания на выходе из решетки и поток по высоте лопатки имеет наиболее равномерную структуру.

Исследование введения тангенциального навала в НА также выполнено для трех сечений. Результа-

ты показаны на рисунках 11-12. В результате применения навала в корневой части НА в сторону поверхности разряжения обеспечивается увеличение запаса газодинамической устойчивости на 3% относительно исходного варианта (Рисунок 12А) и прирост КПД на 0.6% (Рисунок 11А).

При численном исследовании структуры потока при изгибе на 50% высоты лопатки, было получено, что форма оси лопаток НА влияет положительно на запасы ГДУ при навале в сторону спинки. Коэффициент запаса устойчивости ΔK_u при этом возрастает на 1,3% (Рисунок 12Б), по сравнению с исходным вариантом, а граница помпажа смещается вверх и влево. КПД для данного изменения формы лопатки увеличивается на 0,1...0,3%.

Применение навала в НА для периферийного сечения не дает увеличения коэффициента запаса устойчивости, а полученные результаты совпадают с исходным. Наибольшее увеличение эффективности в рабочей точке составляет 0.6% при навале от 12.5% до 15%.

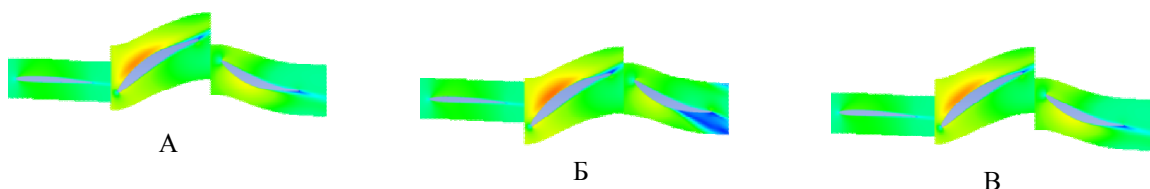


Рис. 7. Распределения чисел Маха в корневой части на поверхности профиля при положительном навале в рабочем колесе в: А – корневом, Б – среднем, В – периферийном сечениях

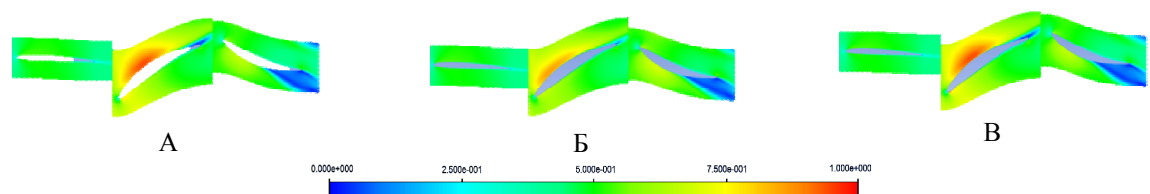


Рис. 8. Распределения чисел Маха в корневой части на поверхности профиля при отрицательном навале в рабочем колесе в: А – корневом, Б – среднем, В – периферийном сечениях

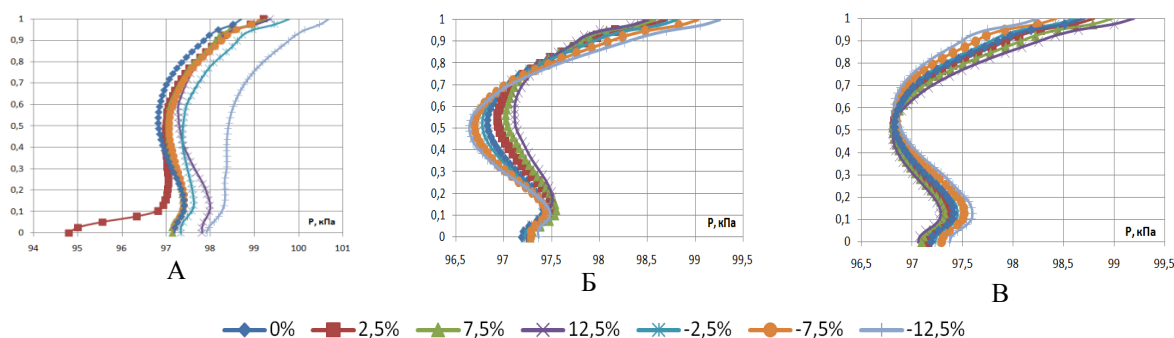


Рис. 9. Распределение статического давления по высоте за ступенью при тангенциальном навале в рабочем колесе в: А – корневом, Б – среднем, В – периферийном сечениях

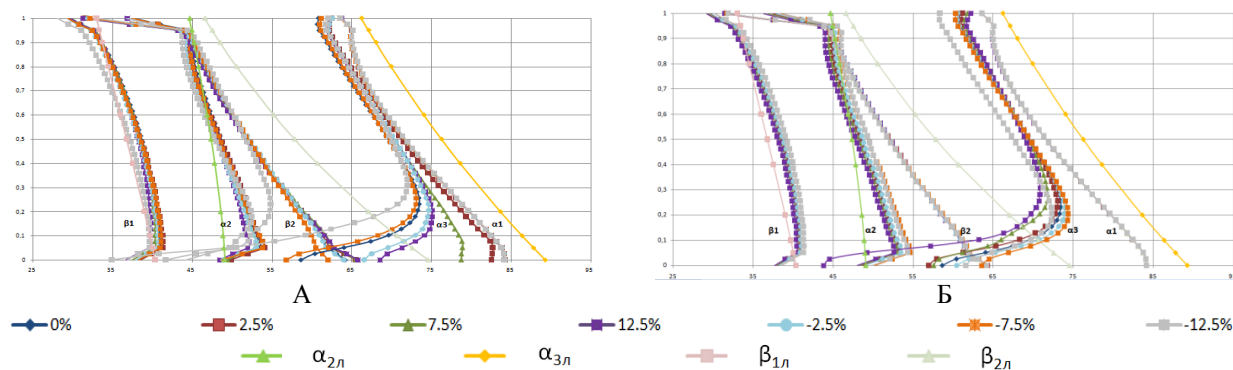


Рис. 10. Распределение углов по высоте ступени при тангенциальном навале в рабочем колесе в: А – корневой, Б – средней частях

Исходя из рисунков распределения числа Маха на поверхности профиля (Рисунки 13, 14), видно, что целесообразно применение положительного тангенциального навала на среднем сечении и отрицательного на корневом, это связано с распределением статического давления по высоте за ступенью (Рисунок 15). То есть, при равномерном распределении статического давления по высоте, как и в рабочем колесе, наблюдается увеличение расхода в корневой части из-за возросшей плотности

и перераспределения динамического напора из средней части в корневую и периферийную зоны.

При использовании навала в корневом сечении в сторону поверхности разряжения поток меняет свое направление преимущественно в корневую зону, что увеличивает плотность тока в данной части. Как видно из распределения углов по высоте ступени, выходной угол из НА становится наиболее приближенным к лопаточному углу. Данное явление подтверждается так же и при навале на

50% высоты в сторону поверхности давления лопатки (Рисунок 16А). Однако, при использовании

навала на 100% значительных изменений в изменении угла потока не замечено.

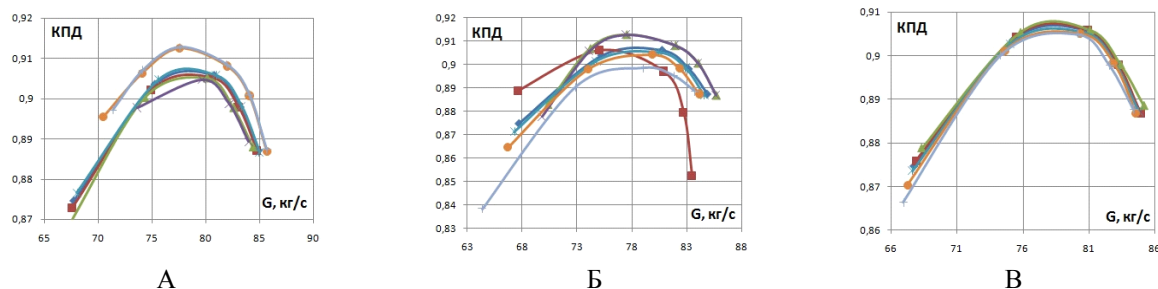


Рис. 11. Характеристика компрессора КПД-G для направляющего аппарата

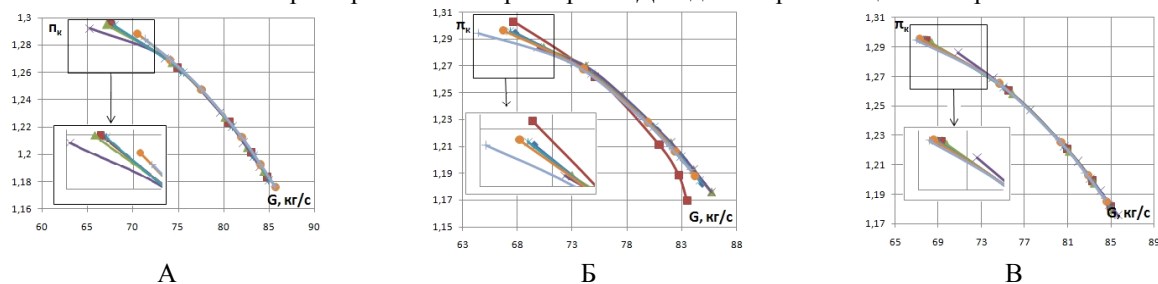


Рис. 12. Характеристика компрессора π_k -G для направляющего аппарата
А – корневое, Б – среднее, В – периферийное сечения

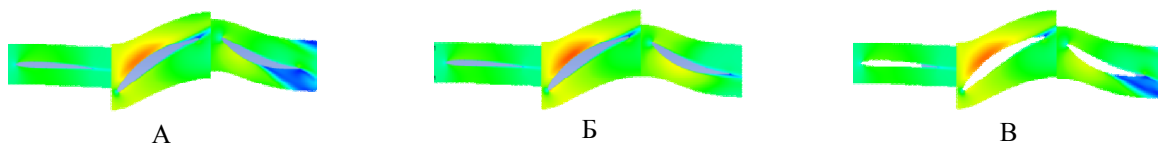


Рис. 13. Распределения чисел Маха в корневой части на поверхности профиля при положительном навале в направляющем аппарате в: А – корневом, Б – среднем, В – периферийном сечениях

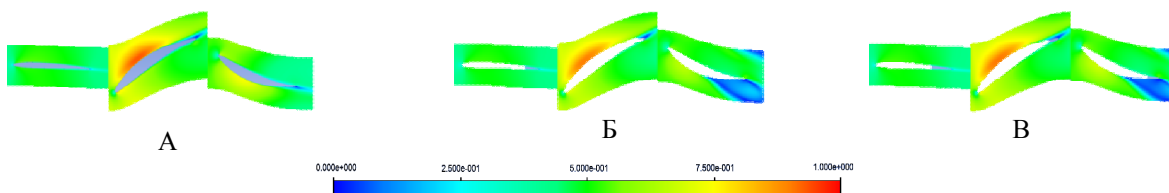


Рис. 14. Распределения чисел Маха в корневой части на поверхности профиля при отрицательном навале в направляющем аппарате в: А – корневом, Б – среднем, В – периферийном сечениях

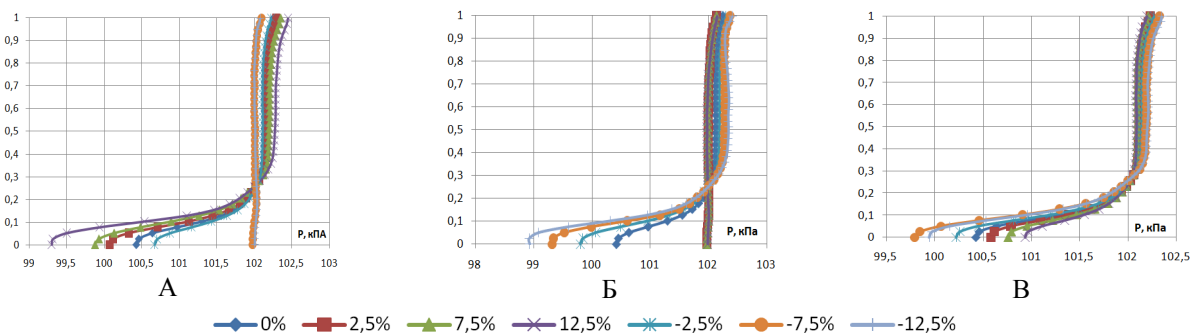


Рис. 15. Распределение статического давления по высоте за ступенью при тангенциальном навале в направляющем аппарате в: А – корневом, Б – среднем, В – периферийном сечениях

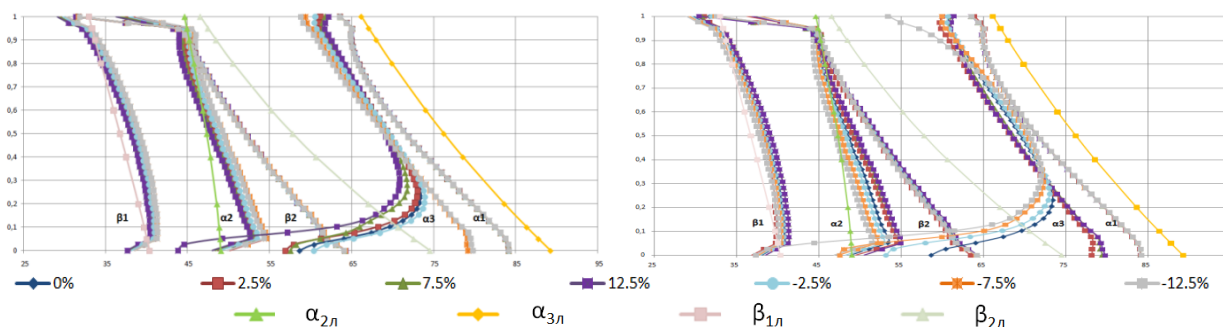


Рис. 16. Распределение углов по высоте ступени при тангенциальном навале в направляющем аппарате в: А – корневой, Б – средней частях

На основании анализа результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение навала на корневой и средней части РК целесообразно при изгибе лопатки в сторону спинки до 7,5%, так как повышается КПД на 1,4% и запас ГДУ на 5%, также идет выравнивание статического давления, которое приводит к снижению срыва потока, то есть к сокращению угла отставания на выходе из решетки, улучшению структуры течения при взаимодействии РК и НА.

2. На лопатках НА в корневом сечении навал в сторону корытца, в диапазоне от -10% до -15% приводит к увеличению КПД на 0,6% и запаса коэффициента устойчивости на 3%, отсутствует срыв потока. На среднем сечении применим положительный навал до 5%, который незначительно влияет на эффективность ($\Delta\text{КПД}=0,1\ldots0,3\%$) и коэффициент ГДУ ($\Delta\text{Ку}\approx 1,3\%$).

3. Применение навала на периферийном сечении не вносит существенных изменений в структуру потока в канале, как в РК, так и в НА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кампсти, Н. Аэродинамика компрессоров [Текст]: пер. с англ. / Н. Кампсти. – М.: Мир, 2000. – 688 с.
2. Шелковский, М. Ю. Параметрическое исследование газодинамических характеристик компрессорных решеток [Текст] / М. Ю. Шелковский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 7 (94). – С. 95–106.
3. Шелковский, М. Ю. Аэродинамическое совершенствование осевого десятиступенчатого компрессора стационарного ГТД. ГПНПКГ “Зоря”-“Машпроект”, Украина.
4. The role of forward sweep in subsonic axial fan rotor aerodynamics at design and off-design operating conditions, A. Corsini and F. Rispoli, Dipartimento di Meccanica e Aeronautica University of Rome La Sapienza Roma, I00184, , Proceedings of IGTI03 48th International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition June 16 19, 2003, Atlanta, Georgia .
5. Бойко А.В. Численное исследование влияния сложного тангенциального навала на характеристики кольцевой реактивной турбинной решетки А.П. Усатый, М.В. Бурлака // *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование: Сб. научн. трудов*. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – № 3. – С. 18-22.
6. Архипов Д. В., Тумашев Р. З. Расчетное исследование влияния тангенциального наклона и косо-го обтекания лопаток направляющего аппарата на работу ступени осевого компрессора. *Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.* 2015. № 11. С. 178–192.